

University of Groningen

## Dynamical modelling of stellar streams in a cosmological setting

Buist, Johannes Theodoor

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2015

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Buist, J. T. (2015). *Dynamical modelling of stellar streams in a cosmological setting*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. University of Groningen.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

# Nederlandse samenvatting

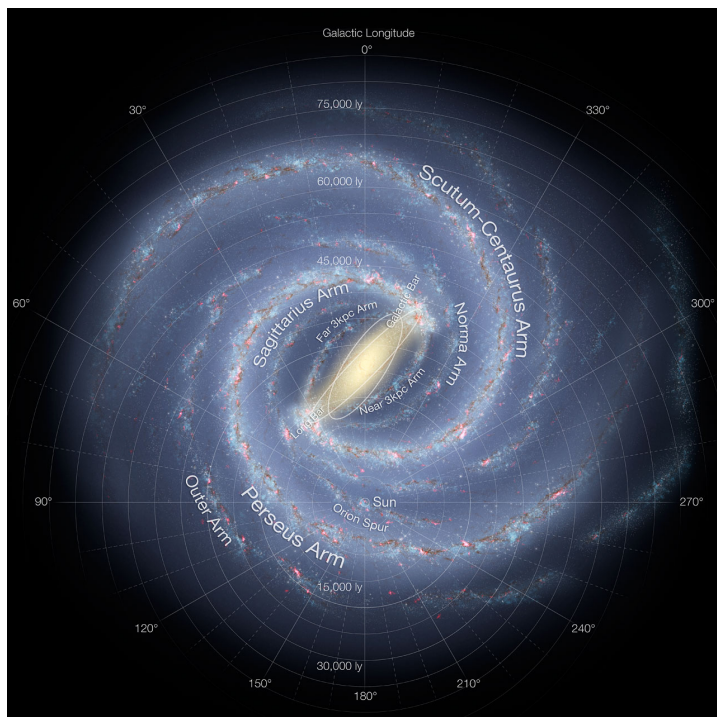
**E**RGENS in een hoekje van ons adembenemend grote en uitdijende heelal bevindt zich een kleine blauwe planeet, onder haar inwoners ook wel bekend als 'Aarde'. De Aarde draait om de Zon, de meest nabije ster, op een gemiddelde afstand van 150 miljoen kilometer. Sterren zijn hete bollen gas (vooral waterstof) die ooit zijn ontstaan door het ineensstorten van een gaswolk. In het binnenste van een ster is de druk en temperatuur zo hoog dat kernfusie kan plaatsvinden. De Zon is een gemiddelde ster uit velen en is ongeveer halfverwege haar levensduur van 10 miljard jaar. De door haar opgewekte energie is de belangrijkste bron van energie op Aarde. De eerstvolgende ster is Proxima Centauri op 40 biljoen kilometer van de Zon, een afstand zo groot dat licht er meer dan 4 jaar over doet om hier te komen (licht heeft een snelheid van ruim een miljard kilometer per uur). Afstanden in het heelal zijn zo enorm dat we ze daarom in de sterrenkunde niet in kilometers tellen maar in parsecs<sup>1</sup> en Proxima Centauri bevindt zich op ongeveer 1,3 parsec. Sterren bewegen allemaal in hun eigen richting die niet precies die van de Zon is. Hierdoor zal Proxima Centauri niet altijd de eerstvolgende ster blijven en zullen ook sterrenbeelden uiteindelijk veranderen.

## De Melkweg

De Zon vormt samen met nog enkele honderden miljarden sterren een (spiraal-) sterrenstelsel, beter bekend als de Melkweg. Omdat we in de schijf van de Melkweg zitten zien we hiervan slechts een stoffige witte band aan de hemel. Door de vele waarnemingen in de Melkweg van sterren, gas en stof (en de voorbeelden van andere sterrenstelsels) denken we dat het een spiraalstelsel is met waarschijnlijk twee grote en twee kleinere spiraalarmen zoals geschetst in figuur 1. De afstand van de Zon tot het midden van de Melkweg is ongeveer 8,5 kiloparsec (1 kiloparsec is 1000 parsec) en de schijf van de Melkweg heeft een diameter van meer dan 30 kiloparsec met een totale dikte van enkele honderden parsecs. In het midden zit een verdikking in de vorm van een balk en daar-

---

<sup>1</sup> Terwijl de Aarde om de Zon draait bewegen nabije sterren zich ogenschijnlijk ten opzichte van veel verder gelegen sterren, de zgn. parallax (een hoek gemeten aan de hemel). 1 parsec is de afstand waarop een ster zich bevindt om een parallax van 1 boogseconde te hebben (1/3600 graad), en is ongeveer 30 biljoen kilometer. Mensen zien diepte op een soortgelijke manier doordat de beide ogen net een beetje een ander beeld zien.



**Figuur 1:** Een gedetailleerde schets hoe we denken dat de Melkweg er uit zit. De Melkweg heeft waarschijnlijk twee grote en twee kleine spiraalarmen en een balk in het midden. De labels in dit figuur geven de namen aan van de diverse spiraalarmen en ook de positie van de Zon. Deze afbeelding is gemaakt door NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt<sup>2</sup>.

om is de Melkweg een zogenaamd balkspiraalstelsel. Rondom de Melkweg ligt ook een meer bolvormige component, een 'halo' van sterren, waarschijnlijk vooral ontstaan door satellietstelsels die ingevallen zijn in de Melkweg en waarvan de sterren verstrooid zijn. Ook bevinden zich zo'n 150 bolhopen - zeer dichte groepen van sterren die door hun eigen zwaartekracht bijelkaar gehouden worden.

De massa van de zon is ongeveer 2 quintiljoen kilogram ( $2 \times 10^{30}$  kg, ongeveer 300.000 keer de massa van de Aarde). Het is dus meteen duidelijk waarom we massa's in het heelal liever uitdrukken in zonsmassa's ( $M_{\odot}$ ). Waarnemingen aan sterren en gas geven aan dat de schijf van de Melkweg een massa heeft van ongeveer 50 miljard zonsmassa's en de stellaire halo een massa van ongeveer 1 miljard zonsmassa's. Dit is alleen veel te weinig om de snelheden waarmee sterren rond de Melkweg bewegen te verklaren. Waarschijnlijk bevindt de Melkweg zich daarom in een nog veel zwaardere halo van 'donkere materie' (ongeveer 1 biljoen zonsmassa's). Donkere materie vormt een van de grootste uitdagingen in de natuur/sterrenkunde van dit moment omdat experimenten op Aarde nog niet hebben geleid tot directe waarnemingen.

<sup>2</sup> Bron: <http://www.eso.org/public/images/eso1339g/>

## Buurstelsels

Rondom de Melkweg vinden we ook enkele satellietstelsels (dwergstelsels) die veel kleiner zijn dan de Melkweg. Het meest nabije is het Sagittarius dwergstelsel, dat verstopt zit achter het centrum van de Melkweg en daarom pas in 1994 werd gevonden. Iets verder weg liggen de grote en kleine Magelhaense wolken, die alleen zichtbaar zijn vanaf het zuidelijk halfrond. Deze dwergstelsels zullen uiteindelijk door de getijdenkrachten van de Melkweg verscheurd worden en onderdeel worden van de stellaire halo van de Melkweg. Het meest nabije grote sterrenstelsel is de Andromedanevel (Messier 31), eveneens een spiraalstelsel maar groter dan de Melkweg. Andromeda en de Melkweg vormen samen met de Driehoeknevel (M33) en al hun satellietstelsels de Lokale Groep van sterrenstelsels. Nauwkeurige metingen aan de beweging van de Andromedanevel geven aan dat deze over ongeveer 5 miljard jaar zal botsen met de Melkweg. Overigens is de kans dat sterren uit de twee stelsels botsen heel klein, maar het gas en stof zal wel botsen waardoor er zich veel nieuwe sterren zullen vormen.

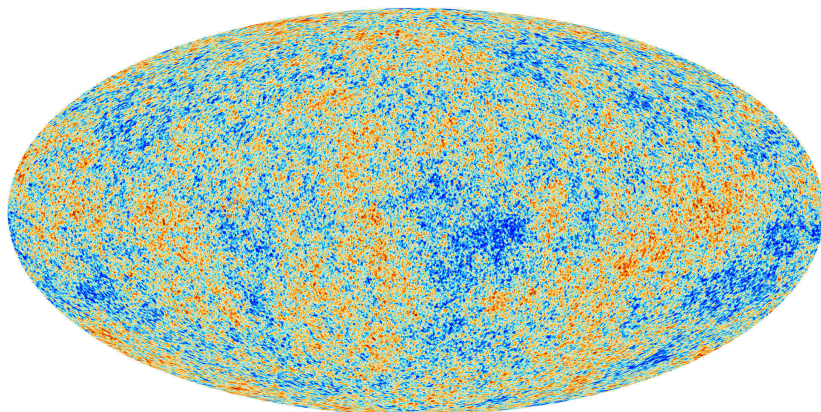
## De uitdijing van het heelal

Aan het eind van de twintiger jaren van de vorige eeuw werd ontdekt dat verweggelegen sterrenstelsels van ons af bewegen met een snelheid die evenredig is met hun afstand: het heelal dijt uit. Door simpelweg de tijd terug te draaien kunnen we daaruit afleiden dat het heelal ooit in een dichtere en daardoor hetere toestand is begonnen, de oerknal. De belangrijkste 'archeologische vondst' in de ruimte is de kosmische achtergrondstraling, die nu een temperatuur heeft van ongeveer -270 graden Celsius (3 graden boven het absolute nulpunt). Ongeveer 400.000 jaar na de oerknal was het heelal voldoende afgekoeld om uit het hete plasma neutraal waterstof te vormen waardoor fotonen (lichtdeeltjes) vrij door het heelal konden stromen. Ruim 13 miljard jaar later nemen wij deze fotonen waar als de kosmische achtergrondstraling.

Om hele grote afstanden in het heelal te meten gebruiken we de gigantische explosies van witte dwergsterren die in een dubbelstersysteem teveel gas hebben gevangen van hun partner (de zogenaamde supernova type Ia). Omdat deze supernova-explosies een vaste helderheid hebben kan de afstand bepaald worden. Uit waarnemingen van verweggelegen supernova's is gebleken dat het heelal niet alleen uitdijt, maar dat deze uitdijing ook versnelt. Deze afstotende kracht wordt ook wel donkere energie genoemd en is mogelijk een soort vacuüm energie die zich in het hele universum bevindt, maar ook hier is nog geen afdoende verklaring voor gevonden. Op de afstand tussen de Melkweg en Andromeda heeft deze versnelde uitdijing geen significante invloed omdat de zwaartekracht tussen de twee stelsels al belangrijker is dan de expansie van het heelal.

## De vorming van structuur

Tegenwoordig zit het heelal vol met sterrenstelsels van groot tot klein, verzameld in groepen en clusters van sterrenstelsels, maar we willen natuurlijk begrijpen hoe deze ontstaan zijn. Een belangrijke aanwijzing is de kosmische achtergrondstraling, die kleine fluctuaties bevat (van ongeveer 1/100.000 graad Celsius) die inzicht geven in het vroege heelal. Hierdoor weten we nu dat het heelal voor maar 5% bestaat uit gewone materie (zoals bijvoorbeeld gas en sterren maar ook zichzelf), voor 27% uit donkere materie en



**Figuur 2:** De kleine fluctuaties in de kosmische achtergrondstraling zoals waargenomen door ESA's Planck satelliet<sup>3</sup>.

voor 68% uit donkere energie, en dat na de oerknal alle materie vrijwel uniform was verdeeld.

Daar waar net een beetje meer materie was trok de zwaartekracht de omliggende materie aan en zo ontstonden de eerste donkere halo's, die ook gas wisten vast te houden. Terwijl de halo's groeiden konden daar de eerste sterren en sterrenstelsels vormen. Deze sterrenstelsels waren vaak klein en werden groter door te fuseren met andere stelsels, door meer gas en donkere materie te verzamelen en door kleinere stelsels te verzwelgen (kosmisch kannibalisme). Ook op grotere schaal vormden zich groepen van stelsels zoals de Lokale Groep, die op haar beurt onderdeel is van de Lokale Supercluster, een cluster van groepen sterrenstelsels<sup>4</sup>.

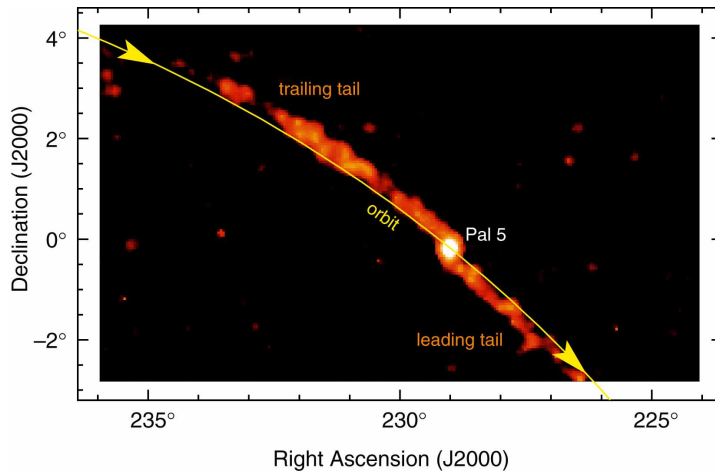
Kijken we naar individuele donkere halo's zoals die van de Melkweg dan blijkt dat diens groei het best beschreven kan worden als 'van binnen naar buiten'. Uit simulaties blijkt namelijk dat het binnenste deel van de halo (waar de Melkweg zit) al zo'n 8 miljard jaar geleden klaar was, terwijl op grotere afstanden van het centrum recente groei door middel van losse donkere materie en dwergstelsels een belangrijke bijdrage levert aan de massa van de donkere halo.

## Sterstromen

Het groeien van de Melkweg gaat door tot op de dag vandaag, zoals bijvoorbeeld door het verzwelgen van het Sagittarius dwergstelsel en de Magelhaense wolken. Kort na de ontdekking van het Sagittarius stelsel in 1994 werd al vermoed dat deze door de getijdenkrachten van de Melkweg beïnvloed werd. Enkele jaren later werd inderdaad een enorme sterstroom gevonden langs de baan die Sagittarius beschreef, nu bekend als de Sagittariusstroom. Zo'n sterstroom ontstaat als sterren losgetrokken worden uit een dwergstelsel of een bolhoop door de getijdenkrachten van de Melkweg. Sommige sterren hebben na dit proces een beetje extra energie en lopen voor het stelsel uit waardoor er

<sup>3</sup> Bron: Planck Collaboration 2014, A&A, 571, A16.

<sup>4</sup> Dit is tot op zekere hoogte vergelijkbaar met hoe (conglomeraten van) bedrijven groeien door kleinere bedrijven op te slokken.



**Figuur 3:** De dichtheid van sterren die waarschijnlijk toebehoren aan de sterstroom van bolhoop Palomar 5 (ook te zien linksonder in de noordelijke hemel van figuur 4). In dit figuur kunnen we heel duidelijk de ‘leidende’ en de ‘volgende’ sterstroom zien. Deze afbeelding is gemaakt door Michael Odenkirchen en Eva Grebel<sup>5</sup>.

een ‘leidende’ sterstroom ontstaat. Andere sterren hebben juist een beetje minder energie en zorgen voor een ‘volgende’ sterstroom. Dit is duidelijk te zien bij de bolhoop Palomar 5 in figuur 3. Uiteindelijk zullen deze sterstromen oplossen en dragen ze hun sterren bij aan de stellaire halo.

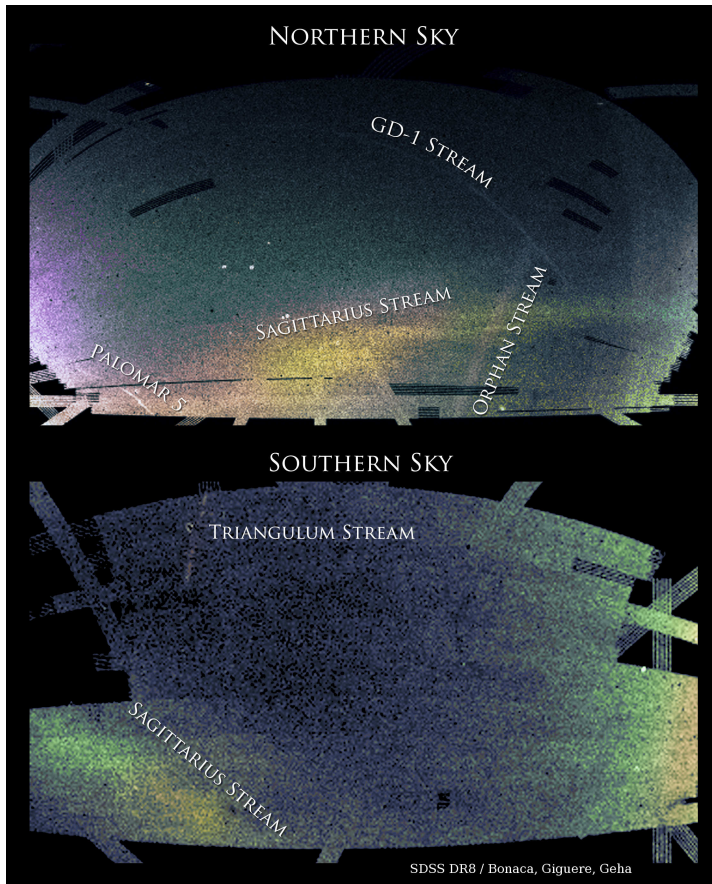
In de loop der jaren is er veel onderzoek gedaan naar sterstromen en zijn er nog veel meer gevonden. Sommige hebben (nog) geen duidelijke voorloper, zoals de Orphan sterstroom (Nederlands: wees), terwijl er ook veel dunne en korte sterstromen gevonden zijn rond bolhopen (zoals eerdergenoemde Palomar 5), omdat ook die langzaam verteerd worden door de Melkweg. Enkele voorbeelden zijn te zien in een stuk van de hemel in figuur 4. Het is lastig om sterstromen te vinden omdat ze verstopt zitten in de halo van de Melkweg, dus eerst moeten we alle sterren uit de schijf van de Melkweg zien weg te halen (de voorgrond), maar ook moet de stroom voldoende opvallen tussen de vele andere sterren in de halo. Ook rond andere stelsels zijn sterstromen gevonden, zoals rond het spiraalstelsel NGC 5907 (figuur 5).

Sterstromen blijken ook bijzonder nuttig te zijn als ‘weegschaal’ voor de Melkweg. Wanneer de sterren eenmaal zijn losgekomen van het dwergstelsel of de bolhoop bewegen ze alleen onder invloed van de zwaartekracht van de Melkweg. De snelheid waarmee ze rond de Melkweg bewegen is daarom direct afhankelijk van de massaverdeling in de Melkweg (zowel van sterren en gas als van donkere materie). Daarnaast vertellen sterstromen over in het verleden verzwolgen dwergstelsels en geven ze hiermee inzicht hoe (delen van) de Melkweg zijn ontstaan. Sterstromen vormen daarom een soort Zwitsers zakmes om de Melkweg te ontleden en in dit proefschrift borduren we daarop verder.

<sup>5</sup> Bron: Odenkirchen et al. 2001, ApJ, 548, L165.

<sup>6</sup> Bron: Bonaca et al. 2012, ApJ, 760, L6.





**Figuur 4:** Het veld der sterstroken in de noordelijke en zuidelijke hemel zoals waargenomen door de Sloan Digital Sky Survey. De kleuren geven de afstanden tot de sterren aan, terwijl de helderheid de dichtheid van sterren aangeeft. De namen zijn aangebracht bij de duidelijk zichtbare sterstroken. Deze afbeelding is gemaakt door Ana Bonaca<sup>6</sup>.

## Dit proefschrift

In dit proefschrift hebben we gekeken naar de invloed van een groeiende donkere halo op sterstroken. Zoals reeds eerder uitgelegd verwachten we dat de Melkweg en zijn donkere halo in de loop van de tijd door blijven groeien, waardoor de uitgeoefende zwaartekracht van de Melkweg op sterstroken toeneemt. Als gevolg daarvan zullen de sterren in de stroom sneller bewegen rond de Melkweg. Op het eerste gezicht hebben we bij een sterstroom alleen inzicht hoe hij er vandaag bij ligt, niet van zijn hele geschiedenis, dus deze hogere mate van rotatie vertelt niet meteen dat de Melkweg gegroeid is. Daarom hebben we gezocht naar signatures van deze evolutie in de eigenschappen van sterstroken. Daarnaast hebben we gekeken naar gedetailleerde simulaties van de stellaire halo in een Melkweg-achtige donkere halo met daarin vele sterstroken om erachter



**Figuur 5:** Sterstroom waargenomen rond het spiraalsterrenstelsel NGC 5907 (welke ten opzichte van ons bijna helemaal op zijn zij staat). Deze afbeelding is gemaakt door R. Jay Gabany en David Martínez-Delgado<sup>7</sup>.

te komen hoe onze beschrijvende modellen werken in een realistischere situatie.

Als eerste hebben we een versimpeld model ontwikkeld om de groei van een donkere halo te beschrijven op een manier die consistent is met kosmologische simulaties en waarbij de halo ook van binnen naar buiten groeit (hoofdstuk 2). Dit soort modellen zijn gebaseerd op uitgebreide en gedetailleerde simulaties van donkere halo's. Omdat eerdere modellen niet altijd voldeden aan eerder genoemde randvoorwaarden hebben we een aangepast model gemaakt dat dit wel doet.

In hoofdstuk 3 hebben we sterstromen gesimuleerd en bestudeerd die geëvolueerd zijn in een simpele donkere halo die groeit volgens het model van hoofdstuk 2. Door de groei van de Melkweg neemt de bindingsenergie van de sterren in de sterstroom geleidelijk toe, waardoor de baan van de sterren telkens een klein beetje verandert. Het blijkt dat een groeiende donkere halo ervoor zorgt dat een sterstroom uiteindelijk een andere lengte en vorm krijgt ten opzichte van een sterstroom die evolueerde in een statische donkere halo. De voorwaarde om de groei van de halo te meten is dat we de massadistributie in de Melkweg goed weten, omdat een verkeerde massa van de Melkweg ook soortgelijke veranderingen kan veroorzaken. Eveneens hebben we onderzocht of dit effect meetbaar is in het licht van de Gaia satelliet, die de sterren in de Melkweg met ongekend groot detail in kaart aan het brengen is.

In het laatste hoofdstuk hebben we sterstromen bestudeerd in realistische simulaties van de aangroei van de stellaire halo voor Melkweg-achtige donkere halo's. Het verschil met hoofdstuk 3 is dat de groei van de donkere halo niet beschreven wordt door een simpel model, maar in detail is gesimuleerd door de hiërarchische samenklontering van kleinere halo's tot grotere. Dit heeft tot gevolg dat de donkere halo zelf vol zit met dwergstelsels en kleine donkere halo's (die te klein waren om voldoende gas aan te trek-

<sup>7</sup> Bron: Martínez-Delgado et al. 2008, ApJ, 689, L184.



ken voor stervorming), hetgeen veel representatiever zou moeten zijn voor de Melkweg. We hebben onderzocht hoe goed we de ware kenmerken van sterstromen in deze simulaties kunnen bepalen met onze modellen als we de massadistributie en de vorm van de donkere halo niet precies goed weten. In dit geval blijkt dat we niet de juiste kenmerken van deze sterstromen terug vinden, en ook moet de massadistributie in veel meer detail bekend zijn om de groei van de Melkweg te kunnen meten.

## Toekomst

In de komende 10 jaar verwachten we veel vooruitgang te kunnen maken in het begrijpen van de Melkweg dankzij de Gaia satelliet. Gaia is bezig in de Melkweg de posities te meten van 1 miljard sterren en de snelheden voor ruim 100 miljoen sterren, slechts beperkt door de helderheid van de sterren. Vele onderzoeksgroepen hebben modellen van sterstromen en de Melkweg ontwikkeld of aangescherpt om klaar te zijn voor deze enorme berg informatie. Naast dat we hopelijk vele bestaande modellen kunnen bevestigen zullen we ongetwijfeld vele nieuwe ontdekkingen doen dankzij het enorme detail van Gaia.

De hoekstenen voor het modelleren van sterstromen zijn al ruim tien jaar geleden gelegd en zijn ook de laatste jaren sterk verbeterd - met name om de massadistributie van de Melkweg te bepalen. Daarnaast zullen sterstromen gebruikt gaan worden om de kleine donkere halo's rond de Melkweg te vinden die met de huidige theorieën over de structuurvorming worden verwacht. Er wordt ook gekeken naar de chemische samenstelling van de sterren in sterstromen, omdat daaruit ook is af te lezen wanneer en in wat voor omgeving de sterren zijn ontstaan. Tot slot geven recente onderzoeken aan dat de Sagittarius sterstroom ook verstoord kan worden door de invloed van de zwaartekracht van andere nabije dwergstelsels zoals de Magelhaense wolken. Een volgende stap is om te zien of onze modellen aangepast kunnen worden om deze effecten te kunnen beschrijven.

Sterstromen zijn niet alleen prachtige structuren rondom sterrenstelsels zoals de Melkweg, maar ze zijn ook een uitstekende weegschaal voor de massaverdeling in de Melkweg en vertellen ons een verhaal over zijn ontstaansgeschiedenis. In dit proefschrift hebben we het eerste begin gemaakt door te kijken naar de invloed van een groeiende Melkweg op sterstromen. Het vormt daarmee waarschijnlijk het topje van de ijsberg van de effecten die een rol kunnen spelen bij sterstromen. Maar ongetwijfeld zullen de zeer gedetailleerde waarnemingen van de Gaia satelliet de ontwikkelingen op het vlak van sterstromen in een stroomversnelling brengen.